

稀土元素在农业中的应用与前景

张海文, 毕然, 董春放, 黄海钊

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年9月7日; 录用日期: 2023年10月5日; 发布日期: 2023年10月16日

摘要

稀土元素对农作物具有增产保收、提高农产品品质和促进营养物质的吸收等多重效果。本文综述了稀土元素在农业生产中的应用, 以及概述稀土元素农用存在的问题。稀土农用通过影响光合作用, 使作物增产, 产品品质得到提升。稀土在土壤中具有抑制土壤病原菌、减少虫害发生的作用, 对改良土壤结构、保存营养物质有一定的效果。此外, 将稀土元素结合稳定同位素, 可用于农产品产地溯源, 结果可靠且高效。稀土元素在农业应用方面具有巨大潜力, 合理使用应该不会给人体带来负面影响。未来需要深入研究稀土农用对特定农作物的最佳应用条件及效果, 以确保农业生产的规范和可持续性。

关键词

稀土元素, 农业生产, 产地溯源

Applications and Prospects of Rare Earth Elements in Agriculture

Haiwen Zhang, Ran Bi, Chunfang Dong, Haizhao Huang

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Sep. 7th, 2023; accepted: Oct. 5th, 2023; published: Oct. 16th, 2023

Abstract

Rare earth elements (REEs) exert multifaceted effects on agricultural practices, encompassing augmented crop yields, heightened product quality, and the facilitation of nutrient assimilation. This paper furnishes a comprehensive survey of REEs' applications in agricultural production, concurrently delineating extant issues germane to their deployment. REEs engender increased crop productivity and enhanced product quality by modulating photosynthetic processes. In the realm of soil dynamics, REEs demonstrate the capacity to suppress soilborne pathogens, mitigate pest incidence, and ameliorate soil structure while preserving nutrient constituents. Additionally, when amalgamated with stable isotopes, REEs prove instrumental in ensuring the provenance and

dependability of agricultural outputs. The agricultural utilization of REEs harbors substantial potential, with their judicious deployment unlikely to engender deleterious implications for human health. Prospective investigations should endeavor to ascertain the optimal conditions and efficacies of REE applications tailored to specific crop varieties, thereby safeguarding the standardization and sustainability of agricultural production.

Keywords

Rare Earth Elements, Agricultural Production, Traceability of Origin

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

稀土元素(Rare earth element, REEs)是指位于元素周期表中原子序数 57 到 71 的镧系元素以及原子序数为 21、39 的元素钪和钇。长期以来,稀土元素一直被广泛应用于工业生产,如电子、能源和材料科学等。然而,近年来,人们逐渐认识到稀土在农业生产中的巨大潜力。稀土用于植物栽培最早可以追溯到 1917 年,钱崇澎与 W. J. V. Osterhout 观察到钷、铈和铈对水绵的特殊生理作用[1]。我国的稀土农用实验起步于 1972 年,先后经过全国多省市验证,逐步证实了稀土的增产效果[2]。经过数十年的研究,含稀土化合物的溶液和磷肥可应用于农业生产,对农作物具有早熟增产、虫害防治、提高农产品品质、促进营养物质的吸收及改良土壤结构等多重效果。我国是农业生产大国,积极探索在保障农产品供应的前提下,更加注重农产品的品质提升也尤为重要。

稀土元素通过调节叶绿体的结构和激发酶活性促进光合作用,提高净光合速率和放氧能力,促使植物对营养物质的积累与储存[3]。与此同时,由于稀土元素的存在,叶绿体的光耐受性得到提升,保证了光合作用的持续、高效性[4]。且稀土元素具有改良土壤、疏通地层的作用,间接促进了植物的生长。不仅如此,其对土壤病原菌表现出的抑制作用,进一步减少病虫害的发生,实现了作物增产的最终目的。有望解决农药持续使用所带来的效果差、残留高等问题,从而实现农业生产的高效性。因此,合理利用丰富的稀土资源,深入研究稀土在农业的应用,将为农业生产的高效性与食品安全的保障提供有力支持,为实现农业生产与环境、社会的协调发展提供新的机遇。

2. 稀土在农业应用的研究现状

2.1. 早熟增产与改善品质

光合作用是植物将太阳能转换化学能,从而合成营养物质以维持生长和生存的基本过程。叶绿体作为植物光合作用的主要场所,其内所含叶绿素含量、结构和分布等因素,对光合作用过程产生显著影响。因此,通过调节叶绿体的生理机能以促进光合作用,是促使作物增产的有效策略之一。研究显示,稀土元素镧、铈和钆通过影响菠菜叶绿体内的叶绿素光能传递、色素捕光能力以及增强对光能的耐受性,激发多种酶活性机制,提高光合作用能力[3][4]。此外,由于稀土元素具有较强的稳定性,Ce³⁺在植物体内可能会代替 Ca²⁺,从而增加叶绿素含量,提高光合效率和放氧能力。

植物的生长过程中,除了需要从土壤中不断吸收 N、P、K 三大营养元素外,微量元素的摄取对于调节植物生长发育同样至关重要。例如硼元素参与植物组织分化和碳水化合物运输,从而促使作物早熟;

铜元素则作为植物酶的组成组分，参与叶绿素的合成和提高呼吸强度；锌元素参与生长素合成，影响植物蛋白质、淀粉的合成；除此之外，一些元素的缺失还会导致植物的抗病性减弱和组织坏死等问题[5] [6]。研究表明，稀土元素作为微量元素的一部分，在促进植物的生长发育和增产早熟方面作用显著[7]。Ribero等人[8]的研究显示，添加稀土元素的磷肥能够使大豆产量提高30%，稀土元素的加入对多种农作物具有明显的增产效果[9] [10]，如黄瓜增产20%、玉米亩增产10%、水稻亩增产11%、大豆增产13%和西瓜增产12%~18%等，且其具有使用便捷、成本较低等优势。更多的研究显示，通过施用含稀土的化肥，农作物不仅产量增加，品质也得到显著提升。以王一之[11]的研究为例，通过底施稀土磷肥于小麦，促进植株增高和穗粒、粒重增加。此外，黄品湖等人[12]的实验表明，喷施稀土肥料的葡萄叶片明显增厚，且叶绿素含量也有所升高，产量增加11%至18%。葡萄中的维生素C与总糖含量以及颗粒饱满度均得到提升，同时还能促进葡萄的早熟，填补市场上葡萄供应的空缺，从而提升了农民的收入。

不同作物施用稀土的效果见表1及图1 (I组清水；II组常规营养物质：a普通磷肥，b纯氮，c增效剂；III组含稀土营养物质：a大丰收，b多得，c稀土磷肥，d稀土氨基酸，e稀土微肥，f植乐)。

Table 1. Effects of rare earth application on different crops

表 1. 不同作物施用稀土的效果

作物	方法	对照组/实验组	对照组亩产量(kg)	实验组亩产量(kg)	亩增产率(%)
马铃薯[13]	喷施	Ia/IIa + IIIa	1598.8	1755.4	10
西红柿[14]	喷施	I/IIIb	5276.7	5869.9	11.2
小麦[11]	底施 + 喷施	IIa + IIb/IIb + IIIa + IIIc	264	352.9	33.70
葡萄[12]	喷施	I/III d	1676.7	1876.7	11.9
玉米[7]	喷施	IIa + IIb/IIa + IIb + IIc + IIIa	497.5	597.5	20.1
甜菜[15]	浸泡 + 喷施	I/IIIe	4008	5188.7	29.5
水稻[16]	喷施	I/III f	621	695	12

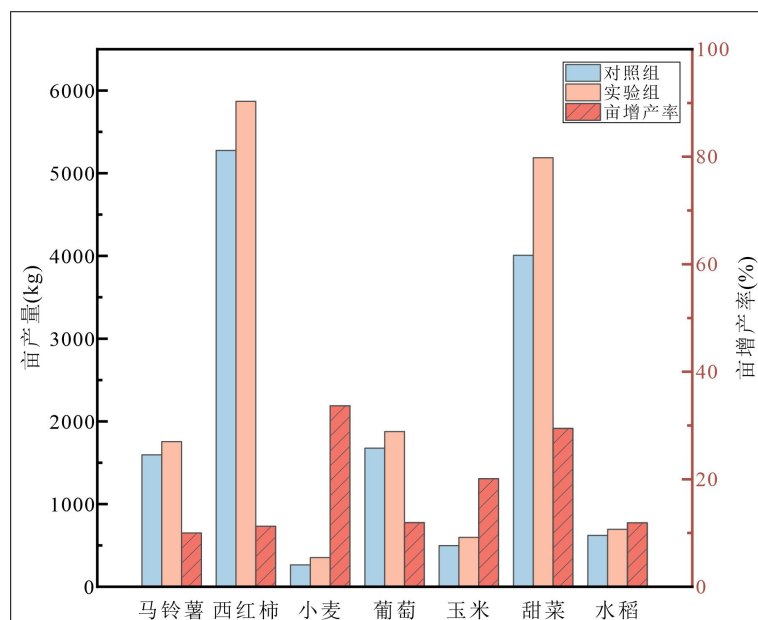


Figure 1. Comparison of mu yield and mu increase rate between control group and experimental group

图 1. 对照组与实验组亩产量对比和亩增产率

2.2. 促进农作物生长与发育

农作物的生长发育是农业生产中不可忽视的关键环节。众多研究已经明确指出，稀土元素在促进作物种子萌发和根茎发育方面具有显著作用[6] [11] [17]。近年的研究也支持这一观点。例如，陈蔚燕等人[18]观察到 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$ 与赤霉素的复配处理能够显著促进小麦种子的发芽，其发芽率较对照组提高了 20% 至 40%；此外，稀土元素对根茎生长同样会产生积极影响。许晟等人[19]发现 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ 可以增强花生的超氧化物歧化酶(SOD)活性、降低过氧化物酶(POD)活性和丙二醇(MDA)含量，从而促进花生植株生长和开花。值得注意的是，稀土元素对种子发芽和根茎发育的促进作用并不仅限于小麦和花生。更广泛的研究结果表明，这一效应同样适用于玉米[7]、大豆[10]、甜菜[15]、水稻[16]等作物，以及红豆杉[20]、山白兰[21]等乔木。这一发现进一步加强了稀土元素在农作物生长发育方面的潜力和应用价值。

2.3. 农产品产地溯源

近年来，伴随着一些地方优质农产品的出现，为产地带来了巨大的产地效益和经济收益，如宁夏枸杞、云南普洱茶等。研究发现，高品质农产品受众多因素影响，其中包括农作物品种、土壤、气候以及种植管理等。而地方优质农产品往往与其独特的土壤环境紧密相关。这些土壤不仅提供矿物质与微量元素以满足植物生长需求，也为其带来了品质上的一些差别。在此背景下，对优质农产品的产地环境进行地球化学分析，不仅可以了解地方特色农产品的生长需求，也有利于增大产量与维护产地品牌效应。国内外不少学者发现，稀土元素能用于判别农产品产地，高效且适用性广，如紫菜[22]、大米[23]和茶叶[24] [25] [26]等(见表 2)。

开建荣等人[27]利用稀土元素与稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$)结合分析，成功区分了西北地区不同产地的枸杞，回代检验和交叉检验的总体判别程度能分别达到 94.8% 和 90.1%，证明稀土元素在大尺度范围内判别枸杞产地的可行性。李安等人[28]利用稀土元素和稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)建立模型，成功判别大桃的产地，样本回代检验和交叉检验判别准确率分别为 97.8% 和 95.7%，验证了稀土元素在产地识别上的可靠性。另外，林昕等人[24]将稀土元素用于判别普洱茶产地的实验也证明了其适用性。因此，利用稀土元素指纹进行产地溯源丰富了稀土元素在农业地质上的应用与前景。

Table 2. Method and accuracy of using rare earth elements as source of agricultural products

表 2. 稀土元素用作农产品产地溯源方法及准确率

作物	方法	准确率
紫菜[22]	REEs + FLD	交叉检验准确率 100%
大米[23]	REEs + $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	水稻的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在与水、土壤显著相关
枸杞[27]	REEs + $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$	正确判别率 90.0% 以上
大桃[28]	REEs + $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$	回代检验 97.8% 和交叉检验判别 95.7%
扁茶[25]	REEs + FLDA	准确率 92.17%
普洱茶[24]	REEs	产地判别率 94.4%

3. 稀土对土壤的影响

3.1. 改良土壤结构，促进营养物质运输与吸收

在自然环境下，土壤中普遍存在稀土元素。稀土元素在土壤中主要以残渣态的形式存在，可交换态

和水溶态的含量均极低[29] [30] [31],而植物只能吸收土壤中的水溶态、可交换态和有机态稀土[32] [33]。通过向土壤底施低浓度的稀土磷肥可以改良土壤结构,促进营养物质的转换及储存,从而达到更易于被植物吸收利用的目的。许多实验研究表明,施用稀土肥料对黄粘土、盐碱土具有疏通地层、改良土壤的作用,进而增强土壤的通透性,有助于营养物质在土壤中的运输传递[34],这可能是农作物增产的主要原因之一。经农业生产验证,稀土能提高土壤磷酸酶的活性,提高农作物对磷肥的利用率[35]。此外,周沁沁等[36]认为土壤中稀土元素含量与 N、K、P 和 Zn 存在正相关关系。进一步的研究显示,土壤中的稀土元素可以保留土壤中速效氮含量,减少氮流失,对保持土壤肥力具有一定的关系[37] [38] [39]。更多的研究表明,稀土可以有效地抑制尿素水解,从而减少土壤中氨的挥发[40] [41]。适当施用稀土可以促进小麦对营养物质 N、P、K 等养分的吸收。同时,稀土元素还具有抑制氨硝化进程的作用,从而降低了作物体内硝酸盐的积累。综上,稀土元素通过改善土壤结构、促进养分转化与储存以及提高养分利用效率等途径,对农作物的增产发挥着积极作用。

3.2. 抑制病原菌生长及提高作物抗病能力

农作物增产与保收需要考虑多方因素,除了顺利的生长发育外,还需要农作物对病害和不良环境具有一定抵抗力。研究发现,稀土元素对病原菌的生存具有抑制作用。以油菜菌核病菌为例,氧化镧溶液的浓度升高与抑制作用增强呈正相关[42]。申凤善等人[43]证实氨基酸稀土配合物对红景天根腐病菌和水稻纹枯病菌均具有较强的抑制作用。此外,武英鹏等人[44]的研究显示镧和硝酸稀土对番茄灰霉病菌、早疫病菌、叶霉病菌及西瓜枯萎病菌的生长和发育均表现出抑制效果,且随稀土浓度的增加而增强。诸海燕等人[45]证明高浓度镧对土壤细菌、放线菌、真菌均有较强的抑制作用;而低浓度镧会强烈刺激土壤硝化细菌,刺激率高达 70%,促进氨态氮向硝态氮转化,利于作物对土壤氮素的有效利用。因而,选择在高浓度与低浓度之间寻找一道平衡,既有益于作物的营养物质供给,同时也降低了病虫害发生的概率。

稀土元素进入农作物体内后,可以通过控制物质代谢等方式,引发活性酶等物质的生成,从而提高抗病能力。张勇等[46]指出,稀土提高了甘蔗叶中酸性转化酶和淀粉酶活性,同时抑制了生长素氧化酶,有助于甘蔗生长。白松等[47]研究发现,使用 300 mg/kg 的硝酸稀土溶液处理种子可将棉花枯萎病的发病率降低约 19%, 100 mg/kg 和 500 mg/kg 浓度的溶液具有抗病增产的效果。

4. 稀土农用存在的问题

值得关注的是,随着稀土农用的推广,稀土元素的持续农用是否会随着食物链传递的方式进入到人体,进而给人体带来健康问题。农业生产的最终目的是为市场上提供优质、健康的农产品。

一些研究显示稀土元素存在“低促高抑”效应,即 Hormesis 现象,指低浓度可以促进农业生产,高浓度表现出对生物体的毒害作用[48]。而这一现象同样会影响人体,即表现出恶心、腹痛、呼吸困难等症状[49]。陈祖义等认为稀土元素在人体内富集,会毒害骨骼、肝脏和脑部等人体组织器官[50] [51] [52]。一些实验表明,持续的稀土元素摄入会给机体带来极大危害[53]。但这是长期连续摄入导致的实验结果,现实中,植物吸收稀土元素的含量微乎其微,食品中增加的稀土元素含量在自然含量变化的波动范围之内[39] [54]。此外,祁俊生等人[55]利用农作物玉米、水稻及大豆对土壤稀土元素的吸收实验中验证,植物吸收的稀土元素含量从高至低依次是根 > 叶 > 茎 > 果实,稀土元素在植物体内不易迁移,主要集中在根部部位,在果实中的含量极少。且即使稀土元素由消化道进入体内也会快速排出[56]。因此,适当的低剂量应用应该不会给生命体带来负面效应。但鉴于此,加强对农产品和土壤的稀土含量监测,在保障农产品质量的同时,也可为食品安全增加一道保障。

5. 结语与展望

稀土元素在农业领域的应用表现出诸多积极影响, 合理应用有助于提高农产品产量和品质以及改良土壤环境。同时, 稀土元素对病害的抑制作用及增强作物的抗病性, 进一步降低了病虫害发生的概率, 从而减少了农药的使用。因此, 稀土农用可以为解决全球食品安全和可持续农业发展提供新的途径。然而, 稀土元素对作物的影响机制尚未清楚。不同作物受到稀土元素的影响程度以及效果均会有所差别。此外, 含稀土元素的营养物质如溶液、磷肥的使用规范仍未出现, 是否会造成过度滥用的问题无从评估。稀土农用的最佳应用浓度及方式仍需要更多、更深入的研究, 以保证农业生产的规范和可持续性。因此, 未来的研究应该集中于深入研究稀土元素农用最佳的应用条件、剂量和方法, 以确保发挥出稀土农用的最大潜力。

参考文献

- [1] 殷宏章, 夏镇澳. 我国植物生理学五十年[J]. 植物学通报, 1983, 1(2): 1-6.
- [2] 劳秀荣, 杨守祥, 马玉增, 等. 稀土农用研究与应用展望[J]. 山东农业大学学报, 1995(2): 257-262.
- [3] 刘超. 稀土元素的理化特性与光合作用的关系及其作用机制[D]: [博士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [4] 梁婣娟. 稀土铈对 UV-B 辐射胁迫下植物光合作用光反应的影响研究[D]: [博士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2006.
- [5] 廖自基. 微量元素铜对农作物生长发育的影响及铜肥的增产作用[J]. 微量元素, 1986(1): 58-59.
- [6] 李文光. 微量元素肥料及稀土肥料应用现状与开发前景[J]. 江西地质, 2001, 15(3): 210-215.
- [7] 姚禄. 稀土肥料在玉米上的增产效果试验研究[J]. 农业科技与信息, 2008(19): 49-50.
- [8] Ribeiro, P.G., Dinali, G.S., Boldrin, P.F., *et al.* (2021) Rare Earth Elements (REEs) Rich-Phosphate Fertilizers Used in Brazil Are More Effective in Increasing Legume Crops Yield Than Their REEs-Poor Counterparts. *International Journal of Plant Production*, **15**, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00129-5>
- [9] 阎春林, 高芳, 董云松. 稀土农用的增产效果及施用技术[J]. 中国农技推广, 2007, 23(6): 39-40.
- [10] 王玉堂. 大豆增产五措施[J]. 农业知识, 2009(19): 22.
- [11] 王一之. 稀土肥料在小麦上的增产效果试验研究[J]. 农业科技与信息, 2008(5): 24-25.
- [12] 黄品湖, 郭秀珠, 雷海清. 稀土肥料在葡萄上的应用效果[J]. 浙江农业科学, 2006(5): 508-509.
- [13] 宋晓东. 不同稀土肥料对马铃薯产量的影响[J]. 农业科技与信息, 2008(19): 53-54.
- [14] 刘灵芝, 宋东升, 张建玲, 等. “多得”稀土纯营养剂在西红柿上的肥效试验[J]. 内蒙古农业科技, 2001(S2): 132.
- [15] 罗志楨, 马静. 稀土微肥在甜菜上的应用效果[J]. 中国糖料, 2008(2): 38-39.
- [16] 韩民利, 邢春强. 水稻应用稀土微肥“植乐”试验效果研究[J]. 河北农业科学, 2005(1): 116-117.
- [17] 汪燕鸣, 王飞, 王跃. 稀土元素农业应用的研究进展[J]. 化工时刊, 2007, 21(2): 47-49.
- [18] 陈蔚燕, 师进生, 李俊良. 调节剂与稀土物质互作对种子发芽和生根的影响[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(6): 935-941.
- [19] 许晟, 刘佳敦, 施和平. 稀土元素铈对花生幼苗生长与抗氧化保护酶系统的影响[J]. 亚热带植物科学, 2021, 50(5): 333-340.
- [20] 彭俊贤. 稀土微肥对南方红豆杉幼苗营养生长的影响[J]. 林业勘察设计, 2021, 41(4): 35-38.
- [21] 王振宇. 稀土元素镧、铈对山白兰幼苗生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [22] 刘春娥, 林洪, 宋雁, 等. 基于稀土元素指纹分析技术的紫菜产地溯源[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 57-61.
- [23] Lagad, R.A., Singh, S.K. and Rai, V.K. (2017) Rare Earth Elements and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Isotopic Characterization of Indian Basmati Rice as Potential Tool for Its Geographical Authenticity. *Food Chemistry*, **217**, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.094>
- [24] 林昕, 黎其万, 和丽忠, 等. 基于稀土元素指纹分析判别普洱古树茶和台地茶的研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(12): 2921-2925, 2893.

- [25] 王洁. 基于稳定同位素比率与矿质元素指纹的扁形茶产地溯源技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [26] 姚清华, 林虬, 颜孙安, 等. 基于稀土元素指纹分析判别安溪铁观音和华安铁观音的研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(4): 295-299.
- [27] 开建荣, 王彩艳, 李彩虹, 等. 基于稀土元素和稳定同位素指纹的枸杞道地性表征[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(13): 169-176.
- [28] 李安, 陈秋生, 赵杰, 等. 基于稳定同位素与稀土元素指纹特征的大桃产地判别分析[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 322-328.
- [29] Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
- [30] 王立军, 王玉琦, 章申, 等. 中国不同类型土壤中稀土元素的形态分布特征[J]. 中国稀土学报, 1997(1): 64-70.
- [31] 翟海, 杨永岗, 胡霁堂. 对我国二十种土壤中稀土元素形态分组的研究[J]. 稀土, 2001, 22(3): 1-5.
- [32] 丁士明, 梁涛, 张自立, 等. 稀土对土壤的生态效应研究进展[J]. 土壤, 2004, 36(2): 157-163.
- [33] 王倩. 土壤稀土形态分析方法与地球化学应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [34] 刘炳文. 大豆施用“稀土磷肥”增产显著[J]. 北京农业, 2000(2): 28.
- [35] 高粱, 夏荣基. 稀土对土壤磷酸酶活性的影响[J]. 稀土, 1989(2): 25-28.
- [36] 周沁沁, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 土壤稀土元素对太行山区大枣品质影响的探讨[J]. 河北农业科学, 2015, 19(6): 40-43.
- [37] 陈义, 黄芳, 陈肖虎. 贵州织金含稀土低品位磷矿综合利用研究[J]. 贵州化工, 2007, 32(6): 1-2.
- [38] 古丽孜亚·哈德然利, 张晓宏. 不同磷肥在杨树育苗中的应用试验[J]. 农村科技, 2009(7): 35.
- [39] 张塞, 王登红, 王伟, 等. 稀土磷肥及含稀土磷矿在农业领域的应用效果与前景[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(5): 583-593.
- [40] 钱晓晴, 沈其荣, 王娟娟, 等. 络合稀土对土壤氮素转化及作物生长的影响[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(3): 41-44.
- [41] 袁铨铭. 镧、铈对石灰性紫色土尿素水解转化及相关酶活性的影响[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2016
- [42] 章健, 承河元, 高倩, 等. 稀土元素对油菜菌核病菌生长及其生化性状影响的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 382-384.
- [43] 申凤善, 李熙英. 氨基酸稀土配合物对植物病原菌及辣椒幼苗生长的影响[J]. 延边大学农学学报, 2008, 30(3): 181-184.
- [44] 武英鹏, 张作刚, 苏朝棉, 等. 镧和硝酸稀土对四种植物病原菌的抑制作用研究[J]. 中国稀土学报, 2012, 30(6): 755-760.
- [45] 褚海燕, 李振高, 谢祖彬, 等. 稀土元素镧对红壤微生物区系的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 28-31.
- [46] 张勇, 欧顺清, 陈西凯. 稀土对甘蔗叶片中几种酶活性的影响及其与生长发育的关系[J]. 西南农业大学学报, 1991(4): 52-56.
- [47] 白松, 邓先明, 谭万忠, 等. 稀土对棉花枯萎病的诱抗增产作用研究[J]. 西南农业大学学报, 1995(1): 28-31.
- [48] 周丽, 周青, 刘苏静. 稀土农用的经济效应和环境生态效应[J]. 中国土壤与肥料, 2007(4): 22-26.
- [49] 刘苏静, 周青. 农用稀土的生态毒理学效应[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 187-190.
- [50] 陈祖义, 朱旭东. 稀土元素的肝脏蓄积性及毒性危害[J]. 家畜生态学报, 2009, 30(4): 98-102.
- [51] 陈祖义. 稀土元素的脑部蓄积性、毒性及其对人群健康的潜在危害[J]. 农村生态环境, 2005, 21(4): 72-73, 80.
- [52] 陈祖义, 朱旭东. 稀土元素的骨蓄积性、毒性及其对人群健康的潜在危害[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(1): 88-91.
- [53] 朱子玉, 沈爱英, 沈颂东. 稀土对小鼠卵母细胞成熟和孤雌活化的影响[J]. 中国公共卫生, 2005, 21(3): 281-282.
- [54] 高俊全. 稀土元素与食物链[J]. 食品工业科技, 1999(S1): 57-60.
- [55] 祁俊生, 付川, 王裕玲. 稀土在农作物中吸收分布[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 27(2): 111-115.
- [56] 牛春吉. 稀土在动物体内的代谢和毒性[J]. 稀土, 1987(5): 52-56.